35

Metrología e instrumentación industrial

35.1 Introducción
35.2 Patrones de medición
35.3 Instrumentos con graduación
35.4 Instrumentos de medición longitudinal comparativa
35.5 Propiedades geométricas: medición de rectitud, planicidad, redondez y perfil
35.6 Máquinas de medición por coordenadas y máquinas de trazado
35.7 Galgas
35.8 Instrumentos ópticos
35.9 Medición automatizada
35.10 Características generales y selección de los instrumentos de medición
35.11 Dimensionamiento geométrico y establecimiento de tolerancias

35.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta los principios, métodos y características de los instrumentos que se usan para hacer diversas mediciones dimensionales. Se define la **metrología industrial** como la medición de dimensiones: longitud, espesor, diámetro, inclinación, ángulo, planicidad, perfiles y diversas cosas. Por ejemplo, considérense las correderas de las máquinas herramientas (fig. 35.1); estos componentes deben tener dimensiones, ángulos y planicidad específicos para que la máquina funcione bien, y con la precisión dimensional deseada.

En forma tradicional, las mediciones se han hecho *después* de que la pieza se ha producido; a esto se le llama **inspección posproceso**. En este caso, el término "inspección" significa comprobar las dimensiones de lo que se ha producido, o lo que se está produciendo, para determinar si se apega a la precisión dimensional especificada. Hoy, la tendencia es hacer las mediciones mientras se está produciendo la pieza, en la máquina; a esto se le llama **inspección en proceso**, *en línea* o *en tiempo real*. Se ha avanzado mucho en el desarrollo de instrumentos nuevos y automatizados que sean muy sensibles a pequeñas variaciones.

Un aspecto importante de la metrología en los procesos de manufactura es la **tolerancia dimensional**, que es la variación permisible en las dimensiones de una pieza. Son importantes las tolerancias por su impacto, no sólo sobre el funcionamiento correcto de un producto sino también sobre los costos de manufactura; mientras menor sea la tolerancia, los costos de producción son mayores.

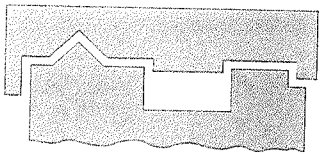


FIGURA 35.1 Sección transversal de una corredera de máquina herramienta. El ancho, profundidad, ángulos y otras dimensiones se deben producir y medir con precisión para que la máquina funcione en forma correcta.

35.2 PATRONES DE MEDICIÓN

Nuestra primera experiencia con la medición suele ser con una sencilla *regla* para medir longitudes (dimensiones lineales). Una regla tiene grabadas líneas que guardan cierta distancia entre sí, con frecuencia de 1 mm (0.040 pulg). En este caso se usa la regla como *patrón* contra el que se miden las dimensiones. Por tradición, en los países de habla inglesa se han usado las unidades de *pulgada* y *pie* (basadas originalmente en partes del cuerpo humano). En consecuencia no era raro encontrar variaciones apreciables en la longitud de un pie.

Sin embargo, en la mayor parte del mundo se ha usado el *metro* (y el sistema métrico) como patrón. Antes se definía el metro como una diezmillonésima de la distancia entre el Polo Norte y el ecuador. La distancia original del metro se normalizó después como la distancia entre dos rayas en una barra de platino-iridio que se guarda bajo condiciones controladas en una construcción en las afueras de París.

En 1960 se definió el metro, en forma oficial, como 1,650,763.73 longitudes de onda, en el vacío, de la luz anaranjada emitida por kriptón 86 (un gas raro) excitado eléctricamente. Se estableció que la precisión de esta medición es 1 parte en 10^9. Hoy en día el metro es la unidad de longitud del Sistema internacional de unidades, o SI, y es el patrón internacional. Las dimensiones más pequeñas se expresan en nanómetros ($1\ nm = 10^{-9}\ m$).

En la metrología industrial se usan muchos instrumentos y dispositivos, cada uno con su propia aplicación, sensibilidad y precisión (tabla 35.1). Definiremos dos términos de uso común para describir el tipo y la calidad de un instrumento (véase la sección 35.10).

a. **Sensibilidad**, llamada también **resolución**, que es la mínima diferencia de dimensiones que puede detectar o distinguir el instrumento. Por ejemplo, una regla de madera tiene mucho menos sensibilidad que una regla graduada de acero.

b. **Precisión**, que a veces se llama exactitud, lo cual es incorrecto, es el grado con el que el instrumento produce mediciones repetidas del mismo patrón. Por ejemplo, una regla normal de madera o de aluminio, se dilata o se contrae de acuerdo con la temperatura del ambiente, y eso produce medidas distintas (y por consiguiente poco confiables).

En la metrología industrial se usan con frecuencia las palabras **instrumento** y **medidor**. En la sección 35.7 se explica además una categoría específica de medidores, las *galgas* y los *calibradores*. En esta categoría es importante controlar la temperatura, en especial para hacer mediciones finas, con instrumentos de precisión. La temperatura normal de medición es 20°C (68°F), y todas las galgas se calibran a esa temperatura. En consecuencia, para lograr precisión, las mediciones se deben hacer en ambientes controlados que por lo general, mantienen esa temperatura con una tolerancia de ±0.3°C (0.5°F).

Ejemplo: Mediciones de longitud en la historia

Se han establecido muchos patrones para medir longitudes durante los últimos 6000 años. Un patrón en boga en Egipto, alrededor de 4000 a.C., era el Codo Real, equivalente a 0.4633 m. Un *codo* equivalía a 1.5 pies (o 2 manos abiertas, 6 manos cerradas o 24 dedos). En 1101 d.C., el rey Enrique I estableció un nuevo patrón, llamado *yarda* (0.9144 m), la distancia de su nariz a la punta de su pulgar.

Durante la Edad Media, casi cada reino y ciudad establecieron su propio patrón de longitud, algunos de ellos con nombres idénticos. J. Fernel, físico francés, propuso en 1528 que la referencia general para longitudes fuera la distancia entre París y Amiens (ciudad a 120 km al norte de París). Durante el siglo XVII algunos científicos sugirieron que la longitud de cierto péndulo se usara como patrón. Sir Christopher Wren, arquitecto británico, sugirió en 1661 usar un péndulo con período de 1/2 segundo. C. Huygens, matemático alemán, propuso un péndulo la tercera parte más largo (aproximadamente) que el de Wren y cuyo período fuera 1 segundo.

Para poner término a la confusión en la medición de longitudes comenzó a desarrollarse un patrón definitivo de longitudes, en Francia, en 1790, con el concepto del *metro*, de la palabra griega *metron*, que quiere decir medida. Se fabricó galga de un metro de longitud, de platino puro y sección transversal rectangular, que se guardó en los Archivos Nacionales, en París, en 1799. Se mandaron copias de esta galga a otros países, a través de los años.

Durante tres años de 1870 a 1872 se reunieron comités internacionales y optaron por un patrón internacional para el metro. La nueva barra se fabricó con 90% de platino y 10% de iridio, con sección transversal en forma de X y dimensiones generales de 20×20 mm. En cada extremo de la barra se grabaron tres marcas. El metro patrón es la distancia entre las marcas centrales en cada extremo, medida a 0°C. Hoy en día, las mediciones de precisión extrema se hacen con base en la velocidad de la luz en el vacío, calculada multiplicando la longitud de onda de un rayo infrarrojo normalizado de un láser, por su frecuencia.

TABLA 35.1 Mediciones e instrumentos usados

Medición	Instrumento	Sensibilidad, μm	Sensibilidad, μpulg
Lineal	Regla de acero	0.5 mm	$\frac{1}{32}$ in.
	Calibrador vernier	25	1000
	Micrómetro con vernier	2.5	100
	Rejilla de difracción	1	40
Ángulo	Escuadra móvil	5 min	
	Barra de senos		
Longitud comparativa	Indicador de carátula	1	40
	Calibrador electrónico	0.1	4
	Galgas	0.05	2
Rectitud	Autocolimador	2.5	100
	Tránsito	0.2 mm/m	0.002 in./ft
	Rayo láser	2.5	100
Planicidad	Interferometría	0.03	1
Redondez	Indicador de carátula		
	Trazado circular	0.03	1
Perfil	Calibrador de radios o chaflanes		
	Micrómetro de carátula	1	40
	Comparador óptico	125	5000
	Máquinas de medición por coordenadas	0.25	10
PASA, NO PASA	Calibrador de tapón		
	Calibrador de anillo		
	Calibrador instantáneo		
Microscopios	Del herramentista	2.5	100
	Secciones ligeras	1	40
	Electrónico de barrido	0.001	0.04
	Barrido con láser	0.1	5

35.3 INSTRUMENTOS CON GRADUACIÓN

Los instrumentos con graduación son empleados para medir longitudes (mediciones lineales) o ángulos (mediciones angulares). *Con graduación* quiere decir marcado para indicar determinada cantidad.

35.3.1 Mediciones lineales (lectura directa)

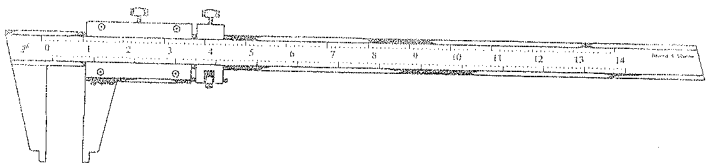
Para determinar dimensiones en forma directa se pueden usar diversos instrumentos comunes de medición lineal:

a. **Reglas.** El instrumento más sencillo y de uso más frecuente para hacer mediciones lineales es una regla (*regla de mecánico*), barra o cinta de acero, con graduaciones fraccionarias o decimales. Las longitudes se determinan en forma directa con precisión limitada a la división más pequeña, que suele ser de 1 mm o 0.040 pulg. Las reglas pueden ser rígidas o flexibles, y algunas veces tienen un gancho en un extremo para facilidad de medir con uno de los bordes. Los *calibradores de profundidad de regla* se parecen a las reglas, pero se deslizan por una cabeza especial.

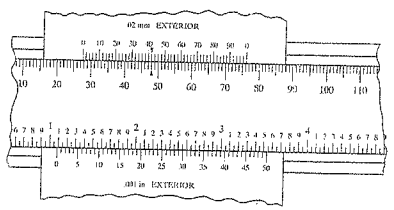
b. **Calibradores vernier**, en honor de P. Vernier, quien vivió en el siglo XVII. Los *calibradores vernier* tienen una regla graduada y una corredera con un *vernier*. Estos instrumentos también son llamados **calibradores** (fig. 35.2a). Las dos quijadas del calibrador tocan la parte que se mide, y la dimensión se lee en las líneas graduadas que coinciden (fig. 35.2b). Los calibradores vernier se pueden usar para medir longitudes interiores o exteriores. El vernier mejora la sensibilidad de la regla sencilla, indicando fracciones de la dimensión mínima de la barra graduada, hasta a 25 μm (0.001 pulg).

FIGURA 35.2 (a) Calibrador con vernier. (b) Un vernier que indica 27.00 + 0.42 = 27.42 mm, o bien 1.000 + 0.050 + 0.029 = 1.079 pulg. La última medición se deduce como sigue: primero, se observa que las dos escalas inferiores tienen las unidades de pulgadas. A continuación se observa que la marca 0 (cero) de la escala inferior ya pasó la marca de 1 pulgada en la escala superior. Por consiguiente, primero se anota una distancia de 1.000 pulg. A continuación se observa que la marca 0 también ya paso de la primera marca (más corta) en la escala superior. Teniendo en cuenta que la distancia de 1 pulgada en la escala superior está dividida en 20 segmentos, hemos pasado una distancia de 0.050 pulg. Por último, observamos que las marcas en las dos escalas coinciden en el número 29. Cada una de las 50 graduaciones de la escala inferior equivale a 0.001 pulg, por lo que también se tienen 0.029 pulg. Por lo anterior, la dimensión total es 1.000 pulg + 0.050 pulg + 0.029 pulg = 1.079 pulg.

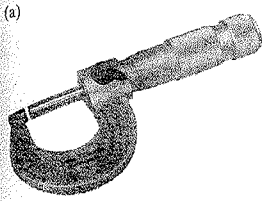
(a)



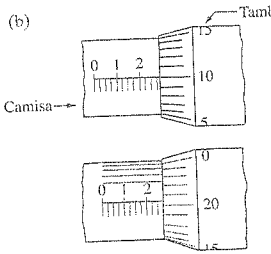
(b)



(a)



(b)



(c)

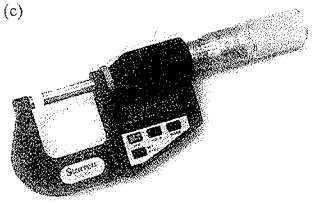


FIGURA 35.3 (a) Micrómetro para medir diámetros de varillas redondas. *Fuente:* L. S. Starret Co. (b) Vernier en la camisa y el tambor de un micrómetro. El de arriba indica 0.200 + 0.075 + 0.010 = 0.285 pulg. El inferior indica 0.200 + 0.050 + 0.020 + 0.0003 = 0.2703 pulg. Estas dimensiones se leen en forma parecida a la que fue descrita en la fig. 35.2. (c) Micrómetro digital con capacidad de 0 a 1 pulg (0 a 25 mm) con resolución de 0.00005 pulg (0.001 mm). Nótese que es mucho más fácil leer las dimensiones en este instrumento que en micrómetro analógico de la parte a). Sin embargo, estos instrumentos se deben manejar con cuidado. *Fuente:* Mitutoyo Corp.

También se consiguen calibradores vernier con *indicador digital* (unidades inglesas o métricas). Estos dispositivos electrónicos (véase la sección 35.4.2) se pueden leer con más facilidad y están menos sujetos al error humano que los vernieres analógicos. Una propiedad importante de los digitales es que se pueden acoplar a impresoras para adquisición de datos, y a microprocesadores. También tienen funciones de control estadístico de proceso y de calidad (véase el capítulo 36).

c. **Micrómetros.** Comunmente son empleados para medir espesores y dimensiones internas y externas de piezas (fig. 35.3a); el **micrómetro** tiene una espiga roscada, un tambor graduado y una camisa graduada (fig. 35.3b). Con un micrómetro se pueden obtener indicaciones del vernier circunferencial hasta con una sensibilidad de 2.5 μm (0.00001 pulg). También se consiguen micrómetros para medir profundidades (*micrómetro de profundidades*) y diámetros internos (*micrómetro de interiores*) con la misma sensibilidad.

Los topes o platinas de los micrómetros pueden tener contactos cónicos o de bola. Se usan para medir oquedades, diámetros de varillas roscadas y espesores de pared de tubos y láminas curvas. Los *micrómetros digitales* también se usan y están equipados con indicadores digitales en unidades inglesas o métricas (fig. 35.3c). También estos se pueden integrar con microprocesadores para control estadístico de proceso y de calidad (véase sección 36.6).

d. **Rejillas de difracción.** Las *rejillas de difracción* consisten en dos vidrios ópticos planos de distintas longitudes con líneas paralelas, muy próximas entre sí, grabadas en sus superficies. La rejilla del vidrio más corto tiene una ligera inclinación. En consecuencia, se producen franjas de interferencia cuando se ve a través del vidrio más largo.

La posición de esas franjas depende de la posición relativa de los dos vidrios. Con equipo moderno y usando contadores electrónicos y sensores fotoeléctricos se pueden alcanzar sensibilidades de 2.5 μm (0.0001 pulg) con rejillas de 40 líneas/mm (1000 líneas/pulg).

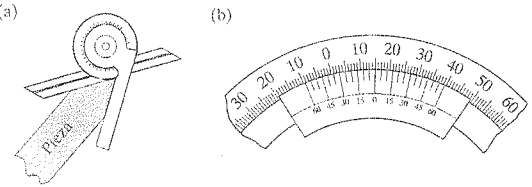


FIGURA 35.4 (a) Esquema de una escuadra ajustable para medir ángulos. (b) Medida en vernier angular, que se lee como 14° 30′.

35.3.2 Medidas lineales (lectura indirecta)

Los instrumentos de lectura indirecta pueden ser **calibradores** y **compases** sin escala graduada alguna. Se usan para transferir la longitud medida a un instrumento de lectura directa, como por ejemplo, una regla. Después de ajustar las patas para que toquen la parte en el lugar que se desee, el instrumento se coloca contra una regla graduada y se lee la dimensión.

Debido a la experiencia requerida para su uso y por su dependencia de escalas graduadas, la precisión de las herramientas de medición indirecta es limitada. Para mediciones indirectas de orificios o cavidades se pueden usar *calibradores telescópicos* (galgas).

35.3.3 Instrumentos de medición de ángulos

Los ángulos se miden con los métodos que describiremos a continuación, en grados o en radianes. Por la geometría que se maneja, suele ser más difícil medir ángulos que dimensiones lineales.

a. **Escuadra ajustable.** Una *escuadra ajustable* es un instrumento de lectura directa, parecido a un transportador común, excepto que tiene un elemento móvil (fig. 35.4a). Las dos hojas del transportador se ponen en contacto con la pieza que se mide y se lee el ángulo en forma directa en la escala vernier. La sensibilidad del instrumento depende de las graduaciones del vernier (fig. 35.4b). Otro tipo de escuadra ajustable es la **escuadra universal**, una regla de acero con escuadras para medir ángulos de 45 y 90°.

b. **Barra de senos.** La medición con una *barra de senos*, o *barra para mesa de senos*, implica colocar la parte sobre una barra o placa inclinada y ajustar el ángulo, colocando galgas en una placa o bloque, o mesa de superficie (fig. 35.5). Después de colocada la pieza sobre la barra de senos, se recorre la superficie superior de la pieza con un micrómetro de carátula.

Se agregan o quitan galgas (sección 35.7.1) hasta que la superficie superior quede paralela a la superficie de la placa. El ángulo en la pieza se calcula con relaciones trigonométricas. Con frecuencia, estos cálculos se simplifican más si se usa una distancia de 10 pulgadas entre los cilindros, para que sea fácil de calcular el seno del ángulo de la barra (de aquí el nombre de barra de senos).

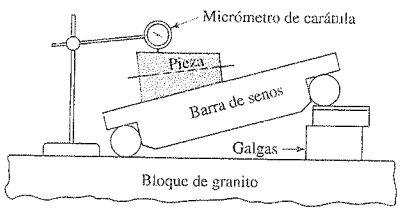


FIGURA 35.5 Dispositivo para usar una barra de senos y medir con precisión los ángulos de una pieza.

c. **Bloques de granito.** Son de hierro colado o de piedras naturales, como el granito; se usan mucho en la metrología industrial. Las superficies de granito tienen las propiedades adecuadas, de resistencia a la corrosión, no magnéticos y con baja dilatación térmica.

d. **Otros métodos.** También se pueden medir los ángulos con **galgas angulares**. Son galgas con distintas *inclinaciones* que se pueden armar en diversas combinaciones, y usar en forma parecida a como se usan las mesas de senos. Los ángulos de partes pequeñas se pueden medir con microscopios de oculares graduados, o con proyectores ópticos (sección 35.5.6). También se pueden medir ángulos de inclinación con un instrumento electrónico digital.

35.4 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN LONGITUDINAL COMPARATIVA

A diferencia de los instrumentos que acabamos de describir, los instrumentos para medición comparativa de longitudes, llamados también instrumentos *tipo desviación*, amplifican y miden las variaciones o desviaciones de distancia entre dos o más superficies. Estos instrumentos comparan dimensiones, de ahí la palabra *comparativa*. A continuación describiremos los tipos comunes de instrumentos utilizados para esta técnica.

35.4.1 Indicadores de carátula

Los *indicadores de carátula* son dispositivos sencillos que convierten desplazamientos lineales de un palpador a la cantidad de rotación de un indicador en una carátula circular (fig. 35.6). El indicador se pone en cero en determinada superficie de referencia y el instrumento, o la superficie por medir (sea externa o interna) pse one en contacto con el palpador. El movimiento del indicador se lee directamente en la escala circular (puede ser positivo o negativo) con una precisión hasta de 1 μm (40 μpulg).

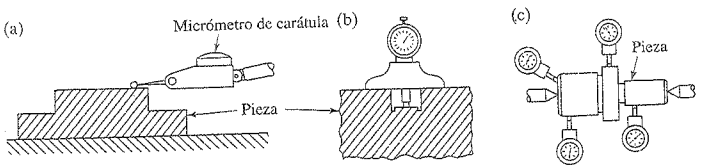
Es posible adquirir indicadores de carátula de diversos diseños, para ser usados como unidades portátiles o de banco. El diseño básico consiste en un piñón y cremallera y un tren de engranes que, en conjunto, convierten el movimiento lineal en movimiento rotatorio, con grandes amplificaciones. Estos instrumentos se usan también para calibrar varias dimensiones de las piezas (fig. 35.6c). También se consiguen instrumentos con mecanismos de amplificación eléctrica o fluídica, así como con indicador digital.

35.4.2 Galgas o medidores electrónicos

A diferencia de los sistemas mecánicos, las *galgas* o *medidores electrónicos* sensan el movimiento del palpador por cambios de resistencia eléctrica de un calibrador de deformaciones (o "galga extensiométrica"), o por inductancia o capacitancia. A continuación las señales eléctricas se convierten y presentan digitalmente como dimensiones lineales (*indicación digital*). En la fig. 35.3c se muestra un micrómetro digital.

En la fig. 35.7 se ve un calibrador electrónico manual, para medir diámetros de barreno o perforaciones. Cuando se comprime su mango un poco, se puede insertar la herramienta en el barreno o perforación y aparece el diámetro interno en forma directa (en la fig. 35.7 se ve en milímetros). Un calibrador electrónico asistido

FIGURA 35.6 Tres usos de los micrómetros de carátula: (a) medición de redondez, (b) de profundidad y (c) determinación de varias dimensiones en una pieza.



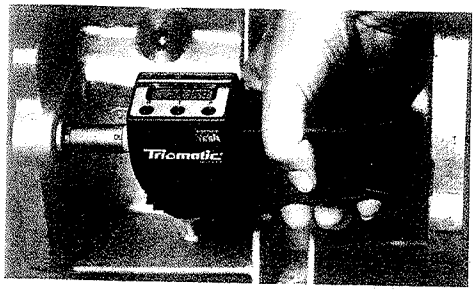


FIGURA 35.7 Calibrador electrónico para medir diámetros interiores. La cabeza medidora tiene tres pernos con puntas de carburo, para resistir el desgaste. La pantalla digital indica 29.158 mm. *Cortesía* de TESA SA.

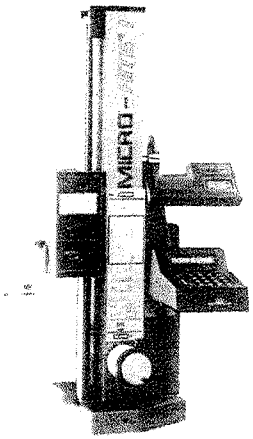


FIGURA 35.8 Instrumento electrónico para medir longitudes verticales con sensibilidad de 1 μm (40 μpulg). *Cortesía* de TESA SA.

con microprocesador se muestra en la fig. 35.8, para medir longitudes verticales. Un calibrador electrónico de uso frecuente es el **transformador diferencial lineal variable**, para medir pequeños desplazamientos.

Aunque son más costosos que los demás tipos, los instrumentos de medición electrónicos tienen las siguientes ventajas: facilidad en el manejo, respuesta rápida, lectura digital, menor posibilidad de error humano, versatilidad, flexibilidad y la posibilidad de integrarse a sistemas automatizados a través de microprocesadores y computadoras (sección 36.11).

Sin embargo, como son más frágiles, los instrumentos y medidores electrónicos se deben manejar con cuidado, y se debe comprobar con frecuencia su calibración. Hoy se venden medidores electrónicos con caras recubiertas con diamante. El recubrimiento por deposición química de vapor (véase la sección 33.5.2) de estos medidores tiene mayor resistencia mecánica que la de los bordes de acero o de carburo de tungsteno; también resiste a las sustancias químicas.

35.4.3 Micrómetros de barrido con láser

Un desarrollo más reciente es el uso de rayos láser para medidas *sin contacto* (fig. 35.9). En este instrumento en particular el rayo láser barre a la pieza 350 veces por segundo. Estos micrómetros pueden alcanzar resoluciones hasta de 0.125 μm (5 μpulg) y son adecuados para mediciones en línea de partes estacionarias, giratorias o vibratorias, y también de piezas que se encuentren a temperaturas elevadas o que sean demasiado elásticas o frágiles.

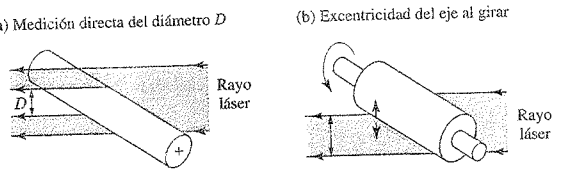


FIGURA 35.9 Dos tipos de mediciones hechas con un micrómetro de barrido con láser. *Fuente:* Mitutoyo Corp.

35.5 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS: MEDICIÓN DE RECTITUD, PLANICIDAD, REDONDEZ Y PERFIL

Las *propiedades geométricas* (rectitud, planicidad, redondez y perfil) son aspectos importantes del diseño técnico y la manufactura industrial. Por ejemplo, las bielas, los componentes de instrumentos y las correderas de las máquinas herramienta deben cumplir con ciertos requisitos respecto a esas características, para que funcionen bien. Por esta razón es esencial su medida con precisión.

35.5.1 Rectitud

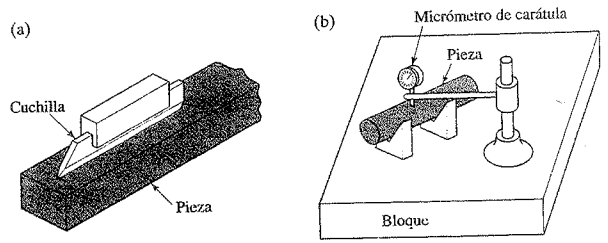
La rectitud se puede comprobar con una regla o un micrómetro de carátula (figs. 35.10a y b). Un **autocolimador**, que se parece a un telescopio con un rayo de luz que regresa del objeto, se usa para medir con precisión pequeñas desviaciones angulares en una superficie plana. Para alinear elementos individuales de máquinas, al ensamblar componentes, se usan métodos ópticos, como *tránsitos* y *rayos láser*.

35.5.2 Planicidad

Se puede medir la planicidad con métodos mecánicos, con un bloque de granito y un micrómetro de carátula. También se puede usar este método para medir la perpendicularidad; esta última también se puede medir con escuadras de acero de precisión. También se puede medir la perpendicular con el catetómetro de la fig. 35.8.

Interferometría. Otro método para medir la planicidad es la interferometría, mediante un **plano óptico**. Este dispositivo es un disco de vidrio o de cuarzo fundido con superficies planas y paralelas; se coloca sobre la superficie de la pieza (fig. 35.11a). Cuando se dirige un rayo de luz *monocromática* (luz de una sola

FIGURA 35.10 Medición de la rectitud con (a) una regla de cuchilla y (b) un indicador de carátula fijo a un soporte que descansa en un bloque de granito. *Fuente:* F.T. Farago.



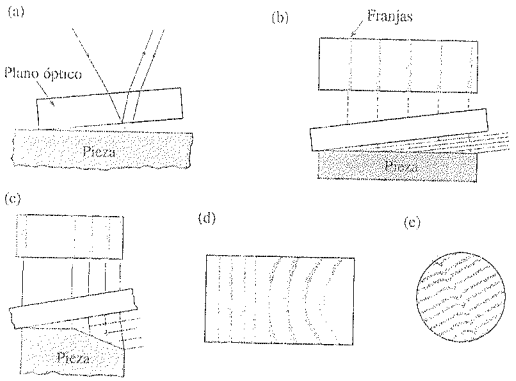


FIGURA 35.11 (a) Método interferométrico para medir planicidad, con un plano óptico. (b) Franjas en una superficie plana inclinada. Un plano óptico descansando sobre una superficie perfectamente plana no divide al rayo de luz y no se producen franjas. (c) Franjas sobre una superficie con dos inclinaciones. *Nota:* mientras mayor sea la inclinación las franjas están más cercanas entre sí. (d) Las figuras con franjas curvas indican curvaturas en la superficie de la pieza. e) Figura de franjas que indica una rayadura en la superficie.

longitud de onda) hacia la superficie, en dirección oblicua, el plano óptico descompone el rayo en dos partes, que se ven a ojo como bandas claras y oscuras (fig. 35.11b).

La cantidad de franjas que aparecen se relaciona con la distancia entre la superficie de la pieza y la superficie inferior del plano óptico (fig. 35.11c). En consecuencia, una superficie realmente plana de la pieza (esto es, una en la que el ángulo entre las dos superficies de la fig. 35.11a sea cero) no descompondrá el rayo de luz y no aparecerán franjas. Cuando las superficies no sean planas, las franjas se curvan (fig. 35.11d). El método de interferometría también se usa para observar texturas y rayaduras superficiales (fig. 35.11e).

La **interferometría láser** se usa para comprobar y calibrar máquinas herramientas (véase la parte IV) respecto a diversas propiedades geométricas durante su ensamble; este método tiene mejor precisión que las galgas o los indicadores. También se usan interferómetros láser para compensar, en forma automática, errores posibles de ubicación en las máquinas de medición de coordenadas (sección 35.6) y en máquinas de control numérico computarizado (sección 38.3).

35.5.3 Redondez

Se suele describir a la *redondez* como una desviación de la forma redonda real, que se manifiesta matemáticamente en un círculo. El término **fuera de redondez** (ovalamiento) es, en realidad, más descriptivo de la forma de la pieza (fig. 35.12a) que "redondez". La redondez real es esencial para el funcionamiento correcto de los ejes giratorios, pistas de rodamientos, pistones y cilindros, y de los balines en los rodamientos.

Los métodos para medir la redondez caen en general en dos categorías. En la primera, la pieza redonda se coloca en un bloque en V o entre puntos (figs. 35.12b y c, respectivamente) y se hace girar, mientras que el palpador del indicador de carátula queda en contacto con la superficie. Después de una rotación completa de la pieza se anota la diferencia entre las indicaciones máxima y mínima en la escala. Esta diferencia se llama **lectura total del indicador**, o *movimiento total del indicador*. También se usa este método para medir la rectitud o perpendicularidad de las caras extremas de los ejes.

En el segundo método, llamado *trazado circular* o *barrido circular*, la pieza se coloca en una plataforma y se mide su redondez girando esa plataforma (fig. 35.12d). Al revés, se puede girar el sensor en torno a una parte estacionaria para hacer la medición.

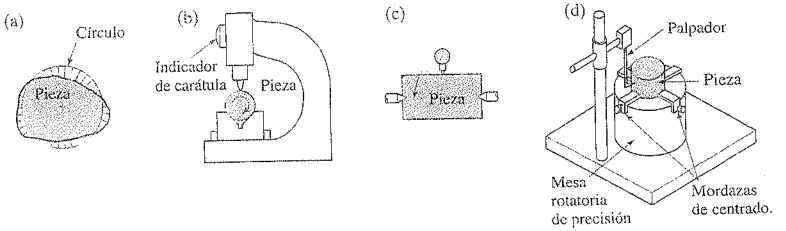


FIGURA 35.12 (a) Esquema de una pieza "fuera de redondez" (exagerada). Medición de la redondez usando (b) bloque en V e indicador de carátula, (c) la parte sostenida entre puntos y girada, y (d) trazado circular, con la parte girando respecto a un eje vertical. *Fuente:* Según F. T. Farago

35.5.4 Perfil

El *perfil* se puede medir con diversos métodos. En uno de ellos, se compara la superficie con una plantilla o calibrador de perfil, para comprobar el apego a la forma. Los radios o los chaflanes se pueden medir con este método (fig. 35.13a). También se puede medir el perfil con varios indicadores de carátula o instrumentos equivalentes (fig. 35.13b) o con las máquinas que se describirán en la sección 35.6.

35.5.5 Medición de roscas y dientes de engranes

Las *roscas* y los *dientes de engranaje* tienen varias propiedades, con dimensiones y tolerancias específicas. Se deben producir con precisión esas dimensiones para obtener a) funcionamiento uniforme de los engranajes, b) la reducción de las magnitudes de desgaste y ruido y c) factibilidad de intercambio de las piezas.

Estas propiedades se miden básicamente con **calibradores de roscas** de diversos diseños, que comparan la rosca producida con una rosca patrón. Algunos de los calibradores son los **calibradores de tapón para roscas**, los **calibradores de paso de rosca** (parecidos a los calibradores de radios; véase la fig. 35.13a), los micrómetros comparadores para roscas y los **calibradores instantáneos** (sección 35.7), con topes con la forma de las roscas.

Los dientes de engranaje se miden con a) instrumentos parecidos a los micrómetros de carátula, b) calibradores (fig. 35.14a) y c) micrómetros con pernos o bolas de distintos diámetros (fig. 35.14b). También se consigue equipo especial para medición de perfiles, como proyectores ópticos y máquinas de medición por coordenadas.

35.5.6 Proyectores ópticos de contorno

Los *proyectores ópticos de contorno*, llamados también **comparadores ópticos** se comenzaron a usar en la década de 1940 para comprobar la geometría de las herramientas de corte para maquinar roscas, pero hoy se usan para comprobar todos los perfiles (fig. 35.15). La pieza se monta en una mesa o entre puntos y la imagen se proyecta en una pantalla con aumentos de 100X o mayores.

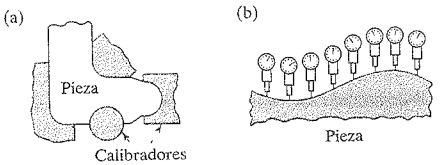


FIGURA 35.13 Perfiles de medición con a) calibradores de radio y (b) indicadores de carátula.

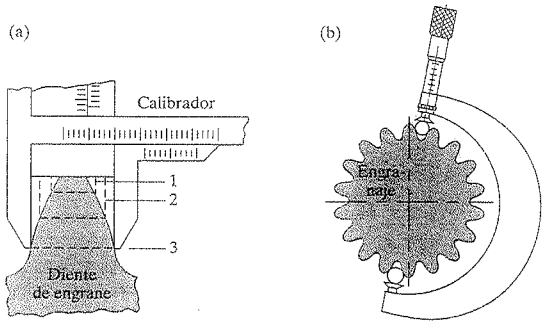


FIGURA 35.14 Medición de espesores y perfil de diente con (a) un calibrador de dientes de engranes y (b) pernos o bolas y un micrómetro. *Fuente:* American Gear Manufacturers Association.

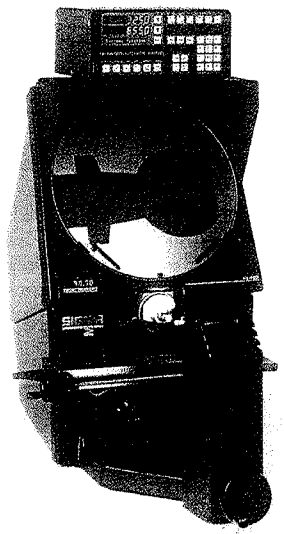


FIGURA 35.15 Proyector de contornos de banco, de rayo horizontal, con pantalla de 16 pulgadas e iluminación de halógeno y tungsteno de 150 W. *Cortesía de* L. S. Starret Company, Precision Optical Division.

En la pantalla se hacen en forma directa las mediciones lineales y angulares; la pantalla está marcada con líneas y círculos de referencia, y se puede girar para poder hacer medidas angulares desde 1 min, con vernieres como los de la fig. 35.4b.

35.6 MÁQUINAS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS Y MÁQUINAS DE TRAZADO

Las máquinas de medición por coordenadas y las de trazado son desarrollos importantes en la metrología. En forma básica consisten en una plataforma donde la pieza que se va a medir se coloca y a continuación se mueve en línea recta o se gira. Un sensor, fijo a una cabeza capaz dé moverse en sentido lateral y vertical, registra todas las mediciones (fig. 35.16). Las *máquinas de medición por coordenadas*, que también se llaman

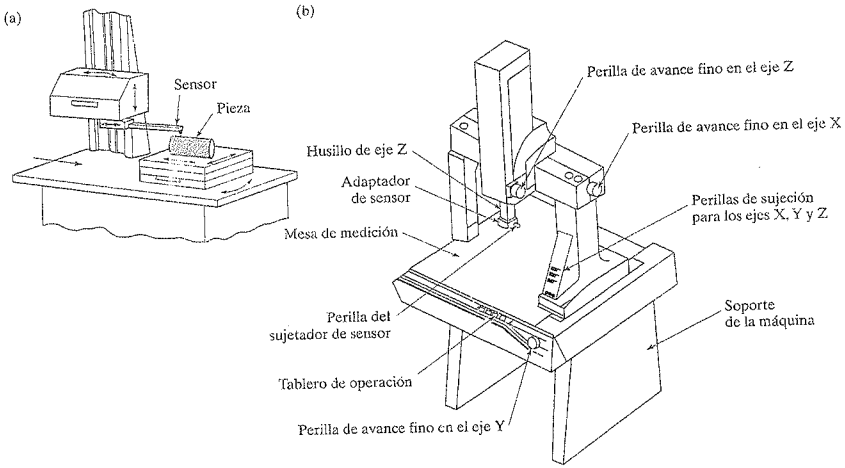

(a)
(b)
Sensor
Pieza
Husillo de eje Z
Adaptador de sensor
Mesa de medición
Perilla de avance fino en el eje Z
Perilla de avance fino en el eje X
Perillas de sujeción para los ejes X, Y y Z
Soporte de la máquina
Perilla del sujetador de sensor
Tablero de operación
Perilla de avance fino en el eje Y

FIGURA 35.16 (a) Esquema de uno de los tipos de máquinas de medición por coordenadas. (b) Componentes de otro tipo de máquina de medición por coordenadas. Estas máquinas se consiguen en diversos tamaños y niveles de automatización, así como con una diversidad de sensores (que se fijan al adaptador correspondiente). Son capaces de medir varias propiedades de una pieza. *Fuente:* Mitutoyo Corp.

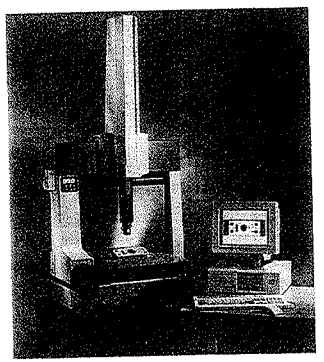


FIGURA 35.17 Máquina de medición por coordenadas. Brown & Sharpe Manufacturing Co.

máquinas medidoras, son muy versátiles; son capaces de anotar mediciones de perfiles complicados, con alta sensibilidad (0.25 μm; 10 μpulg), y con alta velocidad.

Estas máquinas tienen construcción rígida y son muy precisas. Tienen indicador digital y también se pueden conectar a computadoras para inspecciones de piezas en línea (sección 35.9). Se pueden instalar cerca de las máquinas herramientas para hacer eficiente la inspección y tener retroalimentación rápida; de esta forma se corrigen los parámetros de procesamiento antes de fabricar la siguiente pieza.

Las máquinas de medición por coordenadas se hacen cada vez más robustas, para resistir los efectos del ambiente en las plantas manufactureras, como son variaciones de temperatura, vibración y polvo. En la fig. 35.17 se ve una máquina de medición por coordenadas para inspeccionar monoblocks.

Con las **máquinas trazadoras** se pueden medir dimensiones de piezas y piezas grandes, y además tienen indicador de carátula digital. Estas máquinas tienen también punzones de grabar, para marcar dimensiones en partes grandes, con una precisión de ±0.04 mm (0.0016 pulg).

35.7 GALGAS

Hasta ahora sólo se ha mencionado de paso la palabra **galga** para describir varios tipos de instrumentos de medición como calibre plano, galgas de profundidad, galga electrónica y galga de radios. Como hemos visto, la palabra calibrador tiene distintos significados: de presión, de deformaciones (galga) o calibradores de láminas, alambres, rieles de ferrocarril y cañones de arma. Esta sección describe unos calibradores que consisten en cuerpos simples macizos y que no se pueden considerar como instrumentos.

35.7.1 Galgas

Las *galgas*, inventadas por C. E. Johansson a principios de la década de 1900, se llaman también *bloques de Johansson*. Son bloques individuales metálicos, rectangulares o redondos, de diversos tamaños (véanse las galgas en la fig. 35.5), fabricados con mucha precisión, con aceros aleados con tratamiento térmico y relevado de esfuerzos, o con carburos. Sus superficies se asientan y son planas y paralelas, con rangos de 0.02 a 0.12 μm (1 a 5 μpulg). Hoy también se consiguen galgas cerámicas de *zirconia*.

Las galgas se consiguen en juegos de diversos tamaños; algunos de ellos contienen casi cien galgas. Los bloques se pueden armar en muchas combinaciones distintas para obtener las longitudes necesarias. La precisión dimensional puede llegar hasta a 0.05 μm (2 μpulg). Cuando se usan las galgas en mediciones de gran precisión es necesario controlar la temperatura del ambiente.

Las galgas individuales se arman con *torsión*, que es en realidad un movimiento de deslizamiento y giro. Las películas de humedad y aceite, adsorbidas entre las galgas, producen presiones negativas en la interfase y de este modo se hace que las galgas se adhieran entre sí. Este fenómeno se parece a la tendencia que tienen los papeles a pegarse entre sí, cuando el ambiente es húmedo.

Aunque para usarlas se necesita cierta destreza, los conjuntos de galgas se emplean con frecuencia en la industria como precisión longitudinal de referencia. Las galgas desgastadas o dañadas no se deben usar cuando se requieran mediciones muy exactas, aunque pueden seguirse usando cuando se necesite menor precisión. Las *galgas de ángulo* se fabrican en la misma forma, y se usan para calibración de ángulos.

Los cuatro grados básicos de las galgas, por precisión decreciente, son los siguientes:

- Grado 0.5 (antes AAA): galgas de referencia, para trabajos de gran precisión.
- Grado 1 (AA): grado laboratorio, para calibrar instrumentos y otras galgas.
- Grado 2 (A+): grado de precisión, para cuartos de herramientas e inspección.
- Grado 3 (A y B): grado para trabajar y usarse en producción.

35.7.2 Calibradores fijos

Los calibradores fijos son réplicas de las formas de las partes o piezas que se van a medir. Aunque son fáciles de usar y poco costosos, sólo indican si una pieza es muy pequeña o muy grande en comparación con un patrón establecido. No indican las dimensiones reales.

a. Los **calibradores de tapón** se usan para orificios (figs. 35.18 a y b). El *calibrador pasa* (*GO*) es menor que el *calibrador no pasa* (*NOT GO* o *NO GO*), y se desliza en un orificio que tenga una dimensión menor que el diámetro del calibrador. El *calibrador no pasa* no debe entrar en el orificio.

Para esas medidas se requieren dos calibradores, aunque ambos pueden estar en una misma herramienta, sea en sus extremos opuestos, o en forma de dos pasos en un mismo extremo (*calibrador de escalón*). También se consiguen calibradores de tapón para medir conicidades internas (en los que las diferencias entre el calibrador y la parte se indican por la holgura del calibrador), estrías y roscas (en los que el calibrador *PASA* debe atornillar en el orificio roscado).

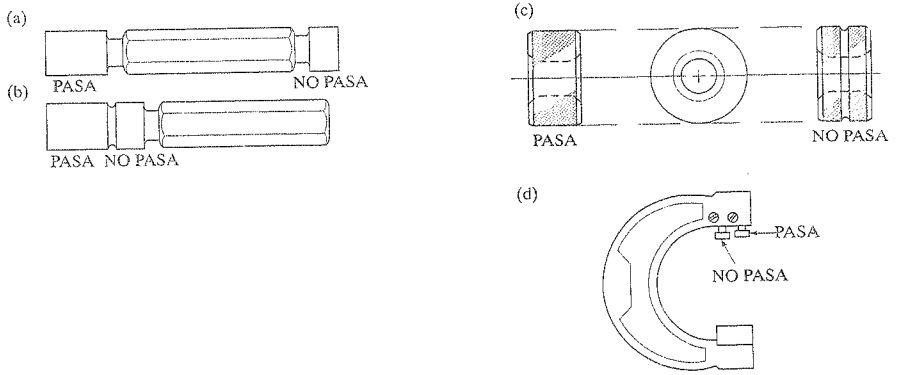


FIGURA 35.18 (a) Calibrador de tapón para orificios, con PASA-NO PASA en extremos opuestos. (b) Calibrador de tapón con PASA-NO PASA en un extremo. (c) Calibradores de anillo simple para calibrar varillas redondas. Nótese la diferencia en las superficies moleteadas, para identificar los dos calibradores. (d) Calibrador instantáneo con topes ajustables.

b. **Calibradores de anillo** (fig. 35.18c) para medir ejes y demás partes redondas. Para medir roscas externas se usan calibradores de anillo con rosca. Las funciones *PASA* y *NO PASA* de esos calibradores se identifican por el moleteado en los diámetros externos de los anillos, como se ve en la figura.

c. Los **calibradores instantáneos** (fig. 35.18d) se usan con frecuencia para medir exteriores. Se fabrican con superficies ajustables de calibración, para partes que tengan distintas dimensiones. Una de las superficies de calibración se puede ajustar a un intervalo distinto de la otra y obtener así un calibrador *PASA-NO PASA* de una unidad.

35.7.3 Calibradores neumáticos

Aunque hay varios tipos de *calibradores neumáticos*, llamados también **calibradores de aire**, su funcionamiento básico se ve en la fig. 35.19. El cabezal del calibrador tiene orificios por los que escapa aire a presión, suministrado por una tubería de presión constante. Mientras menor sea el espacio libre entre el calibrador y el orificio, el aire tiene mayor dificultad para escapar y la contrapresión es mayor.

La contrapresión, la cual es sensada e indicada con un manómetro, se calibra para determinar variaciones dimensionales de orificios. El principio de los calibradores de aire se puede comprender al soplar a través de un popote para bebidas, sujetándolo verticalmente sobre una superficie plana, y variando la distancia de la punta a la superficie.

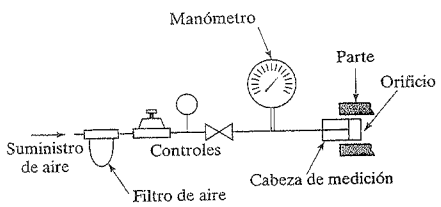


FIGURA 35.19 Esquema de un calibrador neumático.

35.8 INSTRUMENTOS ÓPTICOS

Los **microscopios** son los instrumentos ópticos para ver y medir detalles, formas y dimensiones muy finas en herramientas, dados y piezas de pequeñas a medianas. El microscopio más común y versátil que se usa en los cuartos de herramienta es el **microscopio del herramentista** (toolmaker's microscope). Tiene una *platina* móvil en dos direcciones principales, y su precisión es de 2.5 μm (0.0001 pulg). Se consiguen varios modelos, con funciones diversas para inspecciones especializadas, incluyendo la presentación digital.

La inspección y los sistemas de medición ópticos se están desarrollando, en tal forma que también se pueden inspeccionar objetos o superficies demasiado alejados del instrumento, o que sean delicados o difíciles de iluminar para usar un microscopio normal. Entre esos instrumentos están los **fibrascopios** (sensores de fibra óptica hasta de 6 m, con diámetros desde 0.6 mm que se pueden introducir por pasajes) y los **visores de interiores**, con diámetros de 1.2 mm, para ver superficies internas pequeñas y profundas. Estos aparatos se usan junto con una diversidad de equipos accesorios de vídeo y computarizados, con programas con funciones de almacenamiento y análisis de datos.

Microscopio de luz reflejada. Este instrumento es para medir a) detalles superficiales pequeños, como rayaduras, y b) el espesor de capas y recubrimientos depositados. Se aplica una banda delgada de luz, en dirección oblicua, a la superficie; se ve la reflexión a 90° para ver rugosidades, contornos y otras propiedades superficiales.

Microscopio electrónico de barrido. A diferencia de los microscopios ópticos ordinarios, el *microscopio electrónico de barrido* (SEM, de *scanning electron microscope*) tiene una excelente profundidad de campo, aun con aumentos mayores que 100,000X. En consecuencia quedan en foco todas las regiones de una parte complicada, y se pueden ver y fotografiar para indicar detalles extremadamente finos. Aunque no se puede usar para metrología, este tipo de microscopio tiene utilidad especial en el estudio de las texturas superficiales y patrones de fractura.

35.9 MEDICIÓN AUTOMATIZADA

Al aumentar la automatización en todos los aspectos de los procesos y operaciones de manufactura, se ha hecho obvia la necesidad de la *medición automatizada* o *inspección automatizada* (sección 36.11). Los sistemas flexibles de manufactura y las celdas de manufactura (capítulo 39) han conducido a la adopción de técnicas y sistemas avanzados de medición. De hecho, hoy es necesaria la instalación y uso de esos sistemas, en la manufactura.

Antes se fabricaba un lote de piezas y se mandaban a medir en una instalación de control de calidad por separado. Si este lote pasaba la medición de inspección se mandaba al almacén. Sin embargo, la inspección automatizada se basa en diversos **sistemas de sensor en línea** que vigilan las dimensiones de las partes al estarlas fabricando y, si es necesario, con esas medidas tener datos para corregir el proceso (véase la sección 38.8).

Para apreciar la importancia de vigilar las dimensiones en línea, pensemos en la siguiente pregunta: si una máquina ha estado produciendo determinada parte con dimensiones aceptables, ¿qué factores intervienen para que varíen las dimensiones de la misma parte producida por la misma máquina? Son varios los factores técnicos y humanos que intervienen:

a. Deflexiones estáticas y dinámicas de la máquina, debidas a vibraciones y fuerzas fluctuantes, que a su vez se deben a características de la máquina y variaciones en las propiedades y dimensiones del material que ingresa.
b. Distorsión de la máquina por efectos térmicos, como cambios de temperatura en el ambiente, fluidos de corte, cojinetes y componentes diversos de la máquina.
c. Desgaste de las herramientas, dados y moldes, que a su vez afecta la calidad dimensional de las partes producidas.
d. Errores humanos y cálculos equivocados.

Como resultado de estos factores, varían las dimensiones de las piezas y se hace necesaria la vigilancia continua durante la producción.

35.10 CARACTERÍSTICAS GENERALES Y SELECCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Las características y la calidad de los instrumentos de medición se describen con diversos términos específicos que se definen como sigue:

1. **Precisión.** El grado de coincidencia entre la dimensión medida y su magnitud real.
2. **Amplificación.** Véase Magnificación.
3. **Calibración.** Ajuste o adaptación de un instrumento para obtener indicaciones que sean exactas respecto a un patrón de referencia.
4. **Deriva.** Véase Estabilidad.
5. **Linealidad.** La precisión de las indicaciones de un instrumento en todo su intervalo de medición.
6. **Magnificación.** Relación de la "salida" del instrumento con la dimensión "que entra".
7. **Precisión.** Grado con el que el instrumento produce indicaciones repetidas en la medición del mismo patrón.
8. **Precisión de repetición.** Lo mismo que la precisión, pero repetido muchas veces.
9. **Resolución.** La dimensión mínima que puede indicar el instrumento.
10. **Regla de 10** (*regla del fabricante de calibradores*). Un instrumento o calibrador debe ser 10 veces más exacto que las tolerancias dimensionales de la pieza que se mide. El factor de 4 se llama *regla normal de mil* (*mil*ésimos de pulgada), en el sistema inglés.
11. **Sensibilidad.** La mínima diferencia de dimensiones que puede distinguir o detectar un instrumento.
12. **Velocidad de respuesta.** La rapidez con que un instrumento indica la medida, en especial cuando se miden varias piezas en sucesión rápida.
13. **Estabilidad.** La capacidad de un instrumento para mantener su calibración durante cierto tiempo; a la falta de estabilidad se le llama *deriva* o *corrimiento*.

También, la selección de un instrumento adecuado de medida para determinada aplicación depende de a) el tamaño y el tipo de las partes que se van a medir, b) el ambiente (temperatura, humedad, polvo, etc.), c) destreza requerida del operador y d) costo del equipo.

35.11 DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO Y ESTABLECIMIENTO DE TOLERANCIAS

Las partes y componentes fabricadas en forma individual terminan armándose y formando productos. Se da por hecho que cuando, por ejemplo, se fabrican mil podadoras de pasto y se ensamblan, cada pieza de la podadora entrará en forma correcta en otro componente. Por ejemplo, las ruedas de la podadora se deslizarán con facilidad en sus ejes, o los pistones de un motor ajustarán bien en los cilindros, y en ninguno de los casos las piezas quedarán demasiado apretadas ni demasiado sueltas.

En forma parecida, cuando hay que cambiar un tornillo roto o desgastado en una máquina vieja, se compra un tornillo idéntico. Tenemos confianza que, por nuestra experiencia, el nuevo tornillo entrará bien en la máquina. La razón de nuestra confianza es que el tornillo se fabrica de acuerdo con ciertas normas, y que las dimensiones de todos los tornillos equivalentes varían en cantidades pequeñas y especificadas.

En otras palabras, los tornillos se fabrican con cierto intervalo de tolerancia dimensional; así, todos los tornillos semejantes son *intercambiables*. También se espera que el nuevo tornillo funcione en forma satisfac-

toria durante cierto tiempo, a menos que se abuse de él o se use mal. Los tornillos se someten en forma periódica a pruebas, durante su producción, para asegurarse de que su calidad se apega a las especificaciones (véase también el capítulo 36).

La **tolerancia dimensional** se define como la variación permisible o aceptable en las dimensiones (altura, ancho, profundidad, diámetro, ángulos) de una parte. La raíz de esta palabra es *tolerare* del latín, que quiere decir aguantar o planear de antemano. Son inevitables las tolerancias, porque es virtualmente imposible (e innecesario) fabricar dos piezas que tengan precisamente las mismas dimensiones.

Además, como las tolerancias dimensionales son estrechas, pueden aumentar el costo del producto en forma importante, y son inconvenientes desde el punto de vista económico. Sin embargo, las tolerancias estrechas son necesarias para que ciertas piezas funcionen en forma correcta, y en consecuencia vale la pena el gasto adicional asociado con ellas. Como ejemplo de lo anterior están los instrumentos y calibradores precisos, los pistones hidráulicos y los cojinetes para motores de aviación.

Una actividad llena de desafíos es la medición de tolerancias dimensionales en las piezas, con rapidez y confiabilidad. Por ejemplo, cada una de las 6 millones de piezas de un avión Boeing 747-400 requiere medir alrededor de 25 propiedades, y la cantidad total de mediciones llega al total de 150 millones.

Encuestas realizadas recientemente en Estados Unidos, por el Instituto nacional de normas y tecnología (NIST, *National Institute of Standards and Technology*) demostraron que las tolerancias dimensionales de las piezas manufacturadas con tecnologías ultramodernas, bajan en un factor de 3 cada 10 años, y que esa tendencia continuará. Se estima que las precisiones de a) los tornos y las fresas convencionales (capítulos 22 y 23) subirán pronto desde las actuales de 7.5 μm, hasta 1 μm; b) las cortadoras de obleas con rueda de diamante, en la fabricación de semiconductores, llegarán a 0.25 μm; c) los tornos de precisión, con diamante, llegarán a 0.01 μm, y d) que el maquinado de ultraprecisión, con haz de iones, llegará a menos de 0.001 μm.

35.11.1 Importancia del control de tolerancias dimensionales

Las tolerancias dimensionales sólo son importantes si la parte debe armarse con, o debe corresponder a otra parte. Las superficies que son libres y no intervienen en el funcionamiento, no necesitan de un control cerrado de tolerancias. Así, por ejemplo, la precisión de los orificios y la distancia entre ellos, en una biela, son más críticos que el ancho y el espesor de la biela en varios lugares en su longitud (véase la fig. 14.7). Al revisar las figuras de este libro se puede determinar qué dimensiones y propiedades de las piezas ilustradas son más críticas que otras.

Para apreciar la importancia de las tolerancias dimensionales, imaginemos el ensamble de un eje redondo sencillo en una rueda con orificio redondo, suponiendo que se desea que el diámetro del eje sea 1 pulg (fig. 35.20). Uno va a una ferretería y compra barra redonda de 1 pulgada y una rueda que tenga un orificio de 1 pulgada de diámetro. ¿Entrará el eje en el orificio, sin forzarlo y sin que quede suelto en su interior?

La dimensión de 1 pulgada es el **tamaño nominal** del eje. Si compramos esa barra en distintos lugares o en tiempos distintos, o seleccionamos una dentro de un lote grande, es probable que cada varilla tenga un diámetro un poco diferente. Las máquinas, con los mismos ajustes, pueden producir barras de diámetros un poco diferentes, dependiendo de varios factores, como por ejemplo la rapidez y la temperatura de funcionamiento, la

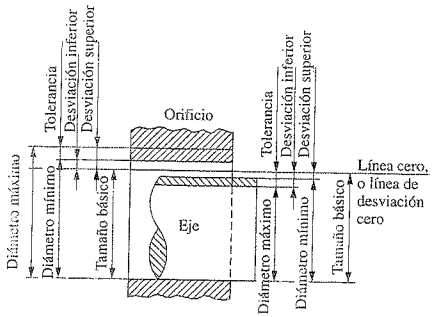


FIGURA 35.20 Tamaño básico, desviación y tolerancia en un eje, según el sistema ISO.

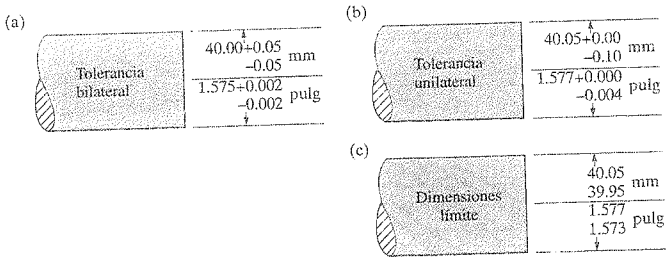


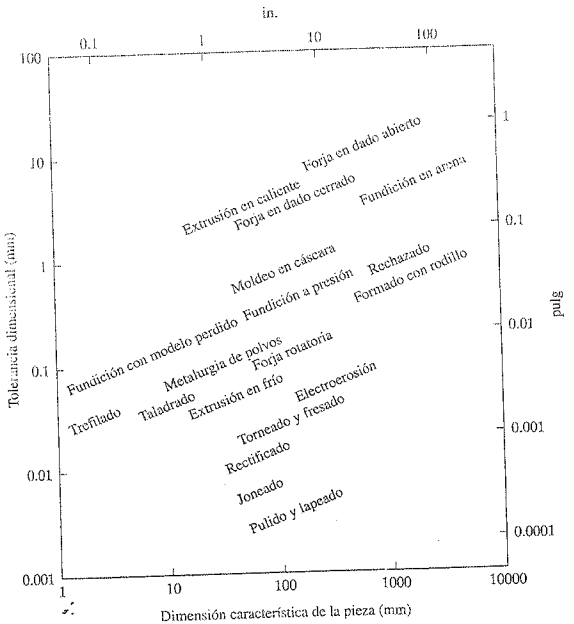
FIGURA 35.21 Diversos métodos de asignar tolerancias a un eje. *Fuente:* L. E. Doyle.

lubricación y las variaciones en las propiedades de la materia prima. Si ahora especificamos *un intervalo* de diámetros para la barra y el orificio en la rueda, podremos anticipar, en forma correcta, qué tipo de ajuste se logrará.

Se ha establecido cierta tecnología para definir con claridad esas cantidades geométricas; como ejemplo tenemos al sistema ISO (*International Organization for Standardization*, Organización internacional para la normalización), que se ve en la fig. 35.20. Nótese que tanto el eje como el orificio tienen diámetros mínimo y máximo, respectivamente, y la diferencia es la tolerancia para cada miembro. Un buen dibujo técnico debe especificar estos parámetros con sus valores numéricos, como se ve en la fig. 35.21.

En varias figuras y tablas de este libro se muestran los intervalos de tolerancias dimensionales posibles en los procesos de manufactura. Hay una relación general entre las tolerancias y el tamaño de la pieza (fig. 35.22)

FIGURA 35.22 Tolerancias en función del tamaño de pieza, para diversos procesos de manufactura. *Nota:* por los muchos factores que intervienen, hay una gran dispersión de tolerancias.



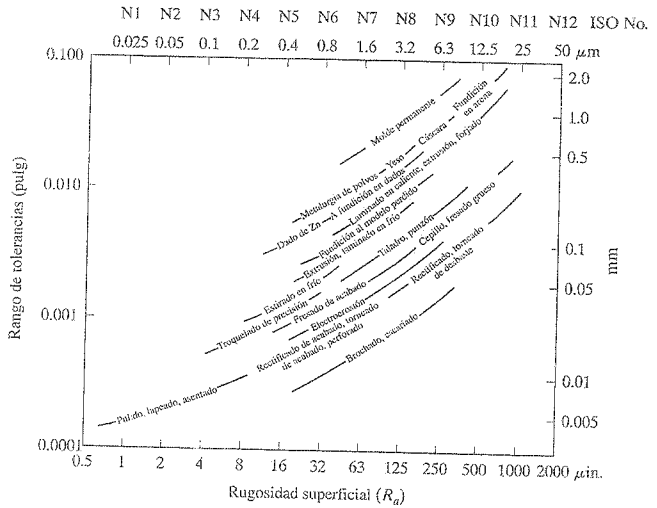


FIGURA 35.23 Tolerancias y rugosidades superficiales obtenidas en diversos procesos de manufactura. Estas tolerancias se aplican a una pieza de 25 mm. *Fuente:* J. A. Schey

y entre las tolerancias y el acabado superficial de las piezas producidas con diversos procesos (fig. 35.23). Nótense los amplios márgenes de tolerancias y acabados superficiales que se obtienen; también, que mientras mayor sea la parte, el intervalo de tolerancia obtenible es mayor.

35.11.2 Definiciones

Para describir las características de relaciones dimensionales entre partes correspondientes se usan varios términos. En las normas ANSI B4.2, ANSI Y 14.5 e ISO/TC10/SC5 aparecen los detalles de esas definiciones. Por las relaciones geométricas complicadas que se manejan, entre las partes que se van a armar, es inevitable que las definiciones de esos términos sean algo confusas.

En la fig. 35.24, se muestran los símbolos de uso frecuente para indicar las características geométricas. A continuación definiremos en forma breve los términos de uso frecuente, en orden alfabético.

1. **Ajuste de interferencia.** Ajuste que limita el tamaño de tal modo que siempre se tenga interferencia al armar las partes.
2. **Ajuste de transición.** Ajuste con holgura pequeña o interferencia, que permite ubicar las partes correspondientes con precisión.
3. **Ajuste flojo.** Ajuste que permite giro o deslizamiento entre las piezas correspondientes.
4. **Ajuste.** Grado de holgura o firmeza que resulta de la aplicación de una combinación específica de holgura y tolerancia en el diseño de las particularidades de las partes compañeras.
5. **Característica.** Parte físicamente identificable en una pieza, como orificio, ranura, perno o bisel.
6. **Condición de material máximo.** La condición en que una propiedad de determinado tamaño contiene la máxima cantidad de material dentro de los límites establecidos para ese tamaño.

(a)

Propiedad	Tolerancia	Característica	Símbolo
Individual (sin referencia)	Forma	Planicidad	▱
		Rectitud	—
		Redondez	○
		Cilindricidad	⌭
Individual o relacionada	Perfil	Perfil de una línea	⌒
		Perfil de una superficie	⌓
Relacionada (requiere referencia)	Orientación	Perpendicularidad	⊥
		Angularidad	∠
		Paralelismo	//
	Ubicación	Posición	⌖
		Concentricidad	◎
	Excentricidad	Excentricidad circular	↗
		Excentricidad total	⌰

(b)

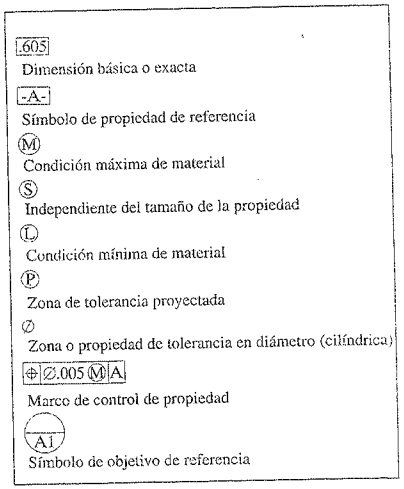


FIGURA 35.24 Símbolos de característica geométrica que se deben anotar en el dibujo técnico de las partes que se van a manufacturar. *Fuente:* The American Society of Mechanical Engineers.

7. **Dimensiones límite.** Las dimensiones máxima y mínima de una parte; también se llaman *límites*.
8. **Establecimiento de tolerancias de posición.** Sistema para especificar la posición, tamaño y forma reales de las propiedades de una pieza, que incluye las variaciones admisibles.
9. **Establecimiento de tolerancias geométricas.** Tolerancias que implican particularidades de forma en la parte.
10. **Establecimiento de tolerancias unilaterales.** Desviación sólo en una dirección respecto a la dimensión nominal.
11. **Grado internacional de tolerancias.** Grupo se tolerancias que varían dependiendo del tamaño básico, pero proporcionan el mismo nivel relativo de precisión dentro de un grado.
12. **Holgura:** El espacio entre las piezas correspondientes.
13. **Interferencia.** Holgura negativa.
14. **Línea cero.** Línea de referencia a lo largo del tamaño básico, respecto a la cual se especifica un intervalo de tolerancias y desviaciones.
15. **Referencia (Datum).** Un eje, punto, línea o plano teóricamente exacto.
16. **Sistema basado en eje.** Tolerancias basadas en una línea cero sobre el eje; también se llama *práctica normal de eje* o *sistema básico de eje*.
17. **Sistema basado en orificio.** Tolerancias basadas en una línea cero en el orificio. También se llama *práctica normal de orificio* o *sistema básico de orificio*.
18. **Tamaño básico.** Es la dimensión de la que se derivan los límites de tamaño, mediante tolerancias y holguras.
19. **Tamaño estándar.** Tamaño nominal, en enteros y subdivisiones comunes de longitud.

20. **Tamaño nominal.** Dimensión aproximada que se usa para identificación general.
21. **Tolerancia bilateral.** Es la desviación (positiva o negativa) respecto al tamaño básico.
22. **Tolerancia de ajuste.** Es la diferencia especificada en las dimensiones de las piezas que se ensamblan; también se llama *dimensión funcional* o *dimensión de suma.*

Como las dimensiones de los orificios son más difíciles de controlar que las de los ejes, se suele usar el sistema basado en orificio para especificar tolerancias en los conjuntos de eje y orificio. Los símbolos que se acostumbra usar para indicar las características geométricas se ven en las figs. 35.24 a y b.

35.11.3 Límites y ajustes

Los límites y los ajustes son esenciales para especificar dimensiones de orificios y eje. Hay dos normas acerca de límites y ajustes, de acuerdo con el Instituto nacional americano de normas (véanse las normas ANSI B4.1, B4.2 y B4.3). Una se basa en el sistema inglés y la otra en el sistema métrico, y se ha desarrollado con mayor detalle. En estas normas las letras mayúsculas siempre se refieren al orificio, y las minúsculas al eje.

En el sistema inglés, los **ajustes** se dividen en las siguientes clasificaciones generales, cada una de las cuales tiene límites de holgura, y el tamaño de orificio es el tamaño básico:

- *Ajustes deslizantes y giratorios*, que se subdividen en las siguientes clases:
  Clase RC1. Ajustes estrechos deslizantes, para colocación exacta de las piezas por ensamblar, sin juego perceptible.
  Clase RC2. Ajustes deslizantes, para piezas que giran y se mueven con facilidad.
  Clase RC3. Ajustes de precisión con movimiento, para trabajo de precisión, a bajas velocidades y presiones ligeras.
  Clase RC4. Ajustes estrechos de movimiento, para maquinaria de precisión con velocidades y presiones moderadas.
  Clases RC5 y RC6. Ajustes intermedios de movimiento, para mayores velocidades y presiones altas.
  Clase RC7. Ajustes de movimiento libre, donde no es importante la precisión.
  Clases RC8 y RC9. Ajustes flojos de movimiento.
- *Ajustes de ubicación con holgura*, para piezas estacionarias que se van a ensamblar y a desarmar libremente.
- *Ajustes de ubicación de transición,* donde es importante la precisión de la ubicación.
- *Ajustes de ubicación de interferencia*, donde es muy importante la precisión de ubicación, y para piezas que requieran rigidez y alineamiento correcto.
- *Ajustes de fuerza y de interferencia*, que se subdividen en las siguientes clases:

  Clase FN1. Ajustes de ensamble ligero, para conjuntos que requieran presiones ligeras.
  Clase FN2. Ajustes de fuerza intermedia, para piezas ordinarias y ajustes de interferencia en secciones ligeras.
  Clase FN3. Ajustes de gran fuerza, para piezas más pesadas e interferencias en secciones intermedias.
  Clases FN4 y FN5. Ajustes de fuerza, para piezas que van a quedar muy forzadas.

En el sistema *métrico*, la ISO clasifica en forma parecida a los ajustes, que se describen como sigue:

	Símbolo ISO	
	Base orificio	Base eje
Ajustes con holgura		
Suelto, móvil	H11/c11	C11/h11
Libre, móvil	H9/d9	D9/h9
Estrecho, móvil	H8/f7	F8/h7
Deslizante	H7/g6	G7/h6
Holgura de localización	H7/h6	H7/h6
Ajustes de transición		
De transición, localización (exacta)	H7/k6	K7/h6
De transición, localización (más exacta)	H7/n6	N7/h6
Ajustes de interferencia		
De interferencia, localización	H7/p6	P7/h6
De fuerza mediana	H7/s6	S7/h6
Ajuste de fuerzas	H7/u6	U7/h6

RESUMEN

- En la tecnología moderna de la manufactura se procesan muchas piezas con un alto grado de precisión, por lo que se requieren instrumentos de medición que tenga diversas funciones y características.
- Se pueden conseguir muchos aparatos para inspecciones, desde simples galgas hasta medidores electrónicos de gran sensibilidad. La selección de cualquier instrumento de medición depende de factores como el tipo de medición para el que se vaya a usar, el ambiente en el que se va a usar y la precisión requerida.
- Se deben comprobar los medidores en forma periódica, contra un patrón confiable. La humedad, el calor, el frío, la vibración y el polvo pueden tener efectos adversos sobre la precisión y la confiabilidad de los calibradores y sus mediciones. También son puntos importantes la destreza necesaria en el operador y el costo de la instrumentación.
- Se ha avanzado mucho en la medición automatizada, conectando los dispositivos medidores con microprocesadores y computadoras, para tener un control exacto dentro del proceso, de las operaciones de manufactura. La interconexión confiable, la vigilancia, presentación, distribución y manipulación de datos son factores importantes, así como los costos incurridos al implementar lo anterior.
- Las tolerancias dimensionales y su selección son factores importantes en la manufactura. Las tolerancias no sólo afectan la precisión y la operación de todos los tipos de maquinaria y equipo, sino también, en forma importante, el costo del producto.
- Mientras más reducido (más estrecho) sea el intervalo de tolerancias especificado, el costo de producción será mayor. Las tolerancias deben ser tan grandes como sea posible, pero también deben apegarse a los requisitos de funcionamiento del producto.

TENDENCIAS

- Se hacen estudios, en forma continua, de la precisión, confiabilidad y rapidez de los instrumentos de medición, y de las máquinas de medición por coordenadas, usados en forma individual o como componentes en sistemas de manufactura con cómputo integrado.

- La medición e inspección automatizada continuarán siendo partes esenciales de todas las operaciones de manufactura.
- Los calibradores de PASA o NO PASA están siendo desplazados por otros que producen una medición numérica, requeridos en el control de calidad y sus técnicas estadísticas en manufactura.
- Las tolerancias dimensionales y su control durante la manufactura continuarán siendo factores importantes en la calidad y confiabilidad de los productos.
- Los instrumentos electrónicos de medición, como los micrómetros digitales y las máquinas de medición por coordenadas, se están integrando con diversos programas para el control estadístico de los procesos de manufactura.

TÉRMINOS CLAVE

Ajustes
Autocolimador
Barra de senos
Calibrador
Calibrador de anillo
Calibrador de tapón
Calibrador fijo
Calibrador instantáneo
Calibrador neumático
Calibrador vernier
Escuadra ajustable
Galga
Galgas o medidores electrónicos
Indicación digital
Indicador de carátula
Instrumento
Instrumentos de línea graduada
Instrumentos de medición longitudinal comparativa
Interferometría
Lectura total del Indicador
Límites
Máquina de medición por coordenadas
Máquina trazadora
Metrología industrial
Micrómetro
Microscopio del herramentista
Patrones de medición
Plano óptico
Precisión
Proyector óptico de contornos
Rejilla de difracción
Resolución
Sensibilidad
Tolerancia
Tolerancia dimensional

BIBLIOGRAFÍA

Bentley, J.P., *Principles of Measurement Systems* (3d ed.). Addison-Wesley, 1995.

Bjorke, O., *Computer-Aided Tolerancing* (2d ed.). ASME Press, 1992.

Bosch, J.A., *Coordinate Measuring Machines and Systems*. Marcel Dekker, 1995.

Creveling, C.M., *Tolerance Control: A Handbook for Developing Optimal Specifications*. Addison-Wesley, 1996.

Farago, F.T., and M.A. Curtis, *Handbook of Dimensional Measurement* (3d ed.). Industrial Press, 1994.

Gooldy, G., *Geometric Dimensioning and Tolerancing* (Rev. ed.). Prentice Hall, 1995.

Henzold, G., *Handbook of Geometric Tolerancing: Design, Manufacturing and Inspection*. Wiley, 1995.

Kennedy, C.W., E.G. Hoffman, and S.D. Bond, *Inspection and Gaging* (6th ed.). Industrial Press, 1987.

Liggett, J.V., *Dimensional Variation Management Handbook: A Guide for Quality, Design, and Manufacturing Engineers*. Prentice Hall, 1993.

Machinery's Handbook. Industrial Press (revised periodically).

Meadows, J.D., *Geometric Dimensioning and Tolerancing*. Marcel Dekker, 1995.

———, *Measurement of Geometric Tolerances in Manufacturing*. Marcel Dekker, 1998.

Tool and Manufacturing Engineers Handbook (4th ed.), Vol. 4: *Quality Control and Assembly*. Society of Manufacturing Engineers, 1987.

Whitehouse, D.J., *Handbook of Surface Metrology*. IOP Publishing, 1994.

Wilson, B.A., *Design Dimensioning and Tolerancing*. Goodheart–Wilcox, 1996.

———, *Dimensioning and Tolerancing Handbook*. Genium, 1998.

PREGUNTAS DE REPASO

35.1 Explique qué quiere decir "patrones de medición".
35.2 ¿Por qué es importante controlar la temperatura mientras se miden las dimensiones?
35.3 Explique la diferencia entre mediciones lineales de lectura directa y de lectura indirecta. Cite los nombres de los instrumentos que se usan en cada categoría.
35.4 Describa el principio de un vernier.
35.5 Explique cómo funciona una rejilla de difracción.
35.6 ¿Qué quiere decir "medición comparativa de longitudes?
35.7 Describa las características de los calibradores electrónicos.
35.8 Explique cómo se mide la planicidad. ¿Qué es un plano óptico?
35.9 Describa el principio de un comparador óptico.
35.10 ¿Por qué las máquinas de medición por coordenadas se han vuelto instrumentos tan importantes?
35.11 ¿Por qué hay distintos grados de galgas?
35.12 ¿Cuál es la diferencia entre un calibrador de tapón y uno de anillo?
35.13 Describa lo que quiere decir "inspección automatizada".
35.14 Haga una lista y explique las características generales de los instrumentos de medición.
35.15 ¿Qué son tolerancias dimensionales? ¿Por qué es importante su control?
35.16 Explique la diferencia entre tolerancia y tolerancia de ajuste.
35.17 Explique qué quiere decir "ajuste de partes compañeras (o correspondientes)".
35.18 ¿Qué es una barra de senos? ¿Por qué tiene ese nombre?
35.19 ¿Cuál es la diferencia entre tolerancia bilateral y unilateral?
35.20 ¿Cómo se mide la rectitud?
35.21 ¿Cómo se hacen las mediciones indirectas?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

35.22 ¿Por qué se confunden con tanta frecuencia, en forma incorrecta, las palabras "exactitud" y "precisión"?
35.23 Explique por qué determinado instrumento puede no tener la precisión suficiente.
35.24 Explique cómo la presencia de humedad y aceite entre las galgas produce presiones negativas.
35.25 ¿Por qué los procesos de manufactura producen piezas con tolerancias con límites tan grandes?
35.26 Explique por qué se necesita la inspección automatizada.
35.27 Las tolerancias dimensionales de los materiales no metálicos suelen ser mayores que las de los materiales metálicos. Explique por qué.
35.28 Comente sus observaciones acerca de la fig. 35.23. ¿Por qué aumenta la tolerancia dimensional al aumentar la rugosidad de la superficie?
35.29 ¿Se pueden automatizar los calibradores de la fig. 35.18 para usarlos en una fábrica con gran volumen de producción? Describa ejemplos.
35.30 Dijimos en la sección 35.7.1 que hoy se están fabricando galgas de circonia. ¿Cuáles son las ventajas y las limitaciones de esas galgas?
35.31 ¿Cómo haría usted para especificar tolerancias dimensionales en una máquina de trazar, para una puerta de automóvil? ¿Cuáles serían las consecuencias de rebasar esos límites de tolerancias?
35.32 Repase la fig. 35.22 y comente sobre el intervalo de tolerancias y las dimensiones de partes que se obtienen con diversos procesos de manufactura.
35.33 Describa sus ideas acerca de los méritos y las limitaciones del equipo digital de medición, respecto al analógico. Describa ejemplos específicos.

35.34 Un eje debe cumplir con un requisito de diseño: tener un diámetro mínimo de 1.25 pulg, pero puede tener un sobretamaño de 0.01 pulg. Exprese la tolerancia del eje, como se encontraría en un dibujo técnico.

35.35 ¿Cuáles son las diferencias entre las reglas del fabricante de calibradores y la regla normal de milésimas de pulgada. ¿Cuáles son las implicaciones para los dispositivos de medición que deben ajustarse a estas reglas?

35.36 En el juego de dardos, ¿es mejor ser exacto o ser preciso?

35.37 ¿Cuáles son las ventajas de los calibradores PASA y NO PASA?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

35.38 Suponga que una regla de acero se dilata 0.15%, por el aumento de temperatura del ambiente. ¿Cuál será el diámetro indicado de un eje, cuyo diámetro a temperatura ambiente era 2.000 pulgadas?

35.39 Haga un esquema de un vernier, parecido al que se ve en la fig. 35.3b, que indique 0.106 pulg en la ilustración superior, y 0.3997 pulg en la inferior

35.40 Trace el esquema de un vernier, parecido al de la fig. 35.4b, que indique a) 15° 17', y b) 2° 56'.

35.41 Calcule el ángulo incluido de la parte que se mide en la fig. 35.5 si la altura de las galgas es 4.2400 pulg y la distancia entre centros de las barras redondas bajo la barra de senos es 5.00 pulg

35.42 Si se usa la misma regla de acero del problema 35.38 para medir extrusiones de aluminio, ¿cuál será el diámetro indicado de una parte que era 2.000 pulg a temperatura ambiente?, ¿cuál es la dimensión real?, ¿y si la parte fuera de termoplástico?

35.43 Para una barra de senos en donde las barras redondas están a 10 pulg de distancia, ¿qué altura de las galgas produce un ángulo de 45° respecto a la horizontal?

SÍNTESIS Y DISEÑO

35.44 Haga algunos esquemas de varias máquinas herramientas de formado y corte (véanse las partes III y IV) e intégrelos con los diversos tipos de equipo descritos en este capítulo. Comente las posibles dificultades que se presenten.

35.45 Describa algunos ejemplos técnicos de los ajustes descritos en este capítulo. Comente su selección de ajustes para determinada aplicación.

35.46 Obtenga una o más de las siguientes piezas, y describa cómo mediría tantas dimensiones clave como sea posible; incluya el tipo de instrumentos que se deben usar y el método de medición. a) Una balata de freno de automóvil. b) Una botella de plástico para gaseosa. c) Un disco compacto o un disquette.

36

Aseguramiento, prueba e inspección de la calidad

36.1 Introducción
36.2 Calidad del producto
36.3 Aseguramiento de la calidad
36.4 Administración de calidad total
36.5 Métodos de Taguchi
36.6 Las normas ISO y QS
36.7 Métodos estadísticos de control de calidad
36.8 Control estadístico del proceso
36.9 Confiabilidad
36.10 Pruebas no destructivas
36.11 Pruebas destructivas
36.12 Inspección automatizada

36.1 INTRODUCCIÓN

En todo este texto hemos observado que un producto manufacturado desarrolla ciertas características externas e internas causadas en parte por los procesos de producción que se usaron. Las características externas implican con más frecuencia dimensiones y tamaño, así como acabado e integridad superficial, como daños superficiales por las herramientas de corte o de fricción durante el procesamiento de la pieza.

Entre las características internas están diversos defectos, como porosidad, impurezas, inclusiones, transformaciones de fase, fragilización, agrietamiento, desprendimiento de capas y esfuerzos residuales. Algunos de esos defectos pueden existir en la pieza bruta original; otros se introducen o se inducen durante las operaciones de manufactura.

Antes de salir al mercado, las partes y los productos manufacturados se inspeccionan revisando distintas características. Esta rutina de inspección tiene especial importancia para a) asegurar que las piezas ajusten en forma correcta en su ensamblado, y b) identificar los productos cuya falla o mal funcionamiento tenga implicaciones potencialmente graves, como por ejemplo, lesiones corporales o muerte.

Entre los ejemplos característicos está la falla de cables, interruptores, frenos, esmeriles, ruedas de ferrocarril, álabes de turbina, recipientes a presión y uniones soldadas. En este capítulo se identifican y describen distintos métodos que se usan con frecuencia para inspeccionar productos manufacturados.